



☐ 公開
☒ 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e203

農業部林業及自然保育署112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：熱改質技術於耐久性竹材製品開發之
應用（3/3）（第3年/全程3年）
(英文名稱) Application of Thermal
Modification Technology on the
Development of Durable Bamboo
Products (3/3)

計畫編號：112農科-7.4.4-務-e2(3)

全程計畫期間：自 110年1月1日 至 112年12月31日

本年計畫期間：自 112年1月1日 至 112年12月31日

計畫主持人：吳志鴻
研究人員：許晉瑋、王重堯、尤荃
執行機關：國立中興大學



1123080



農業部林業及自然保育署 112 年一般科技計畫

研究報告

計畫名稱：熱改質技術於耐久性竹材製品開發之應用(3/3)

Application of Thermal Modification Technology
on the Development of Durable Bamboo Products
(3/3)

計畫編號：112 農科-7.4.4-務-e2(3)

計畫主持人：吳志鴻 特聘教授

執行機關：國立中興大學 森林學系





一、執行成果中文摘要：

本計畫利用氙弧燈加速耐候試驗，探討不同真空水熱處理孟宗竹材於耐候試驗期間之物理機械及化學性質變化，以評估試材之耐候性質，並藉此尋求孟宗竹材之最適化真空水熱處理條件。試驗結果顯示，未處理與經真空水熱處理孟宗竹材之色差值（ ΔE^* ）均隨加速耐候試驗時間增加而增加；其中，真空水熱處理組別中又以 180°C -16h 者色差值最高（23.7），而 160°C-4h 組則最低（14.3）。此外，藉由表面細胞結構觀察、質量損失率、機械性質與全反射式傅立葉轉換紅外線光譜分析（Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR）的結果可以得知，孟宗竹材以 160°C 進行 4 h 真空水熱處理時，相較於其它真空水熱組別其受到加速耐候實驗的影響較為輕微。相對的，熱處理條件愈劇烈者，其耐候性後性質愈不佳。此外，本計畫先前的報告亦指出，孟宗竹材經 160°C-4h 真空水熱處理時，即能有效降低吸濕性並提高尺寸安定性，故該條件可作為未來國產孟宗竹材改質處理之參考。

二、執行成果英文摘要

This project employed xenon arc lamp accelerated weathering tests to investigate the changes in physical, mechanical, and chemical properties of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) treated with different vacuum hydrothermal (VH) processes during weathering tests. The aim was to evaluate the weathering properties of the various VH-treated moso bamboo and to determine the optimal VH treatment conditions. The results indicated that the color difference value (ΔE^*) for both untreated and VH-treated moso bamboo increased with increasing the duration of the accelerated weathering tests. Specifically, the bamboo treated at 180°C for 16 h exhibited the highest ΔE^* (23.7), while the bamboo treated at 160°C for 4 h had the lowest (14.3). Moreover, through observations of surface cell structure, mass loss rate, mechanical properties, and analysis using attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), it was found that moso bamboo treated at 160°C for 4 h experienced relatively minor effects from the accelerated weathering tests compared to





other treatment groups. Conversely, more intense VH treatment conditions resulted in poorer weathering properties. Furthermore, previous reports from this project had indicated that treating moso bamboo at 160°C for 4 h effectively reduced its hygroscopicity and improved its dimensional stability, suggesting that this condition could serve as a reference for future modification treatments of domestically produced moso bamboo.

三、計畫目的

近年來，環境保護及自然資源保育之重要性逐漸受到全球重視，使得木竹材等可再生之天然生物性材料資源的有效與合理利用廣受探討。其中，竹類分布相當廣泛，舉凡熱帶、亞熱帶、溫帶，甚至寒帶均可見其蹤跡，且以亞洲地區分布最廣，佔世界竹林面積之85%（路統信，1986；王瀛生、吳孟玲，2010）。而台灣森林面積中約有6%為竹林（邱立文等人，2015），且竹材具有無性生長繁殖、生長快、成材早、產量高以及材質好等特性，故為台灣重要之再生性森林資源（邱祈榮，2011）。台灣六大經濟竹種中，孟宗竹除為台灣中部地區主要竹種之外，其竹肉較為厚實，且具有良好之加工性，故為業者常用竹種之一（文化部，2014；吳仕揚，2015）。

另一方面，竹材製品一般易受其吸濕性之影響而產生收縮膨脹，進而導致尺寸安定性不佳，加上容易受到真菌、白蟻、蛀蟲、海蟲以及細菌等生物性危害，最終影響竹製品之品質（Martínez et al., 2005；Wang et al., 2012；Zheng et al., 2015）。根據早期研究指出，熱改質處理技術不僅能有效改善木材之尺寸安定性（Korkut and Bektas, 2008；Cao et al., 2012；Icel et al., 2015）、耐久性以及耐腐朽性（Esteves and Pereira, 2009；Ohnesorge et al., 2009；Rowell et al., 2009；Lovrić et al., 2017）等性質，亦為對環境較友善之木材改質方法。而熱改質處理技術依加熱介質之差異，主要可分為水熱處理（Hydrothermal treatment）、惰性氣體熱處理以及油熱處理（Oil heat treatment）三大類（Esteves and Pereira, 2009）；其中，以惰性氣體熱處理之研究最廣，而油熱處理則具有均勻受熱之特性，惟處理後殘留於木材之油則容易影響後續利用。相對的，水熱處理因加熱介質為水蒸氣，故除能降低因快速升溫所造成之木材開裂等缺陷之外，亦能有效降低成本及能量消耗



1123080



(Fujino et al., 2002)，且無油熱處理之介質殘留問題。此外，若於升溫前進行處理槽預真空，則可去除槽內及木材內之空氣，使熱處理環境處於低氧狀態，並降低水之沸點讓槽體於較低溫度時即能充滿水蒸氣，同時亦能有效降低熱處理材之開裂 (Wentzel et al., 2019)。然而，目前將真空水熱處理技術 (Vacuum-hydrothermal treatment, VH treatment) 應用於耐久性竹材製品開發之相關研究仍十分缺乏，故實值得進行系統性的相關研究與試驗。

有鑑於此，本計畫第一及第二年已針對不同伐採季節以及不同真空水熱處理條件之國產孟宗竹材，進行化學組成分及相關物理機械性質分析。而本計畫第三年則擬利用氙弧燈人工加速耐候試驗機，針對第二年所製備不同熱改質處理竹材進行耐候試驗，除進行表面顏色、X-ray 繞射 (X-ray diffraction)、傅立葉轉換紅外線光譜 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 以及近紅外線光譜 (Near-infrared spectroscopy, NIR) 檢測，以探討熱處理對孟宗竹材耐候性質之影響，藉此評估其用以開發耐久性竹材製品之可行性外，同時亦擬實際打樣展示用樣品，以作為未來商品產業化之參考。





四、材料與方法

(一) 試驗材料

1. 孟宗竹材

本試驗所使用之竹材係購自南投縣竹山鎮欣林竹材加工廠之 4 年生以上國產孟宗竹 (Moso bamboo)，其伐採季節為秋季 (9 月)。試驗原竹於伐採後選取其中央段，將圓筒狀原竹剖為 3–6 片竹片，再將竹青部分之蠟質去除後，裁切為寬度 30 mm 之竹片。該竹片放至氣乾後，續以雙面鉋將其表底面刨光成平整表面，並裁切尺寸為 900 mm × 30 mm × 5 mm (長 × 寬 × 厚) 之試材，以供後續進行真空水熱處理之用。

(二) 孟宗竹材之真空水熱處理

本試驗將孟宗竹材置於自製之可控溫控壓之半工業級熱處理槽 (槽體內部直徑及長度分別為 400 及 1200 mm) 中，並添加處理槽內體積 1/100 之蒸餾水 (約 1500 mL) 於槽內後，利用抽氣幫浦將槽內壓力降至 23 kPa 以下，以達到真空狀態。接著，以 3 °C/min 之升溫速率，將槽內溫度分別升溫至 160 與 180°C 後，於水蒸氣環境下進行不同時程 (4、8 以及 16 h) 之水熱處理。待試驗結束後，冷卻至 50°C 以下，即可取得各組熱處理材。各組試材之試驗代號、熱處理溫度、持溫時間以及持溫結束時槽內壓力則如表 1 所示。最後，將試材置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中進行調濕，以供後續試驗之用。

表 1. 真空水熱處理之製程條件

Table 1. Process conditions for VH treatment

Sample code	Temperature (°C)	Duration (h)	Pressure (MPa)
160°C-4h	160 ± 5	4	0.12
160°C-8h	160 ± 5	8	0.14
160°C-16h	160 ± 5	16	0.16
180°C-4h	180 ± 5	4	0.19
180°C-8h	180 ± 5	8	0.24
180°C-16h	180 ± 5	16	0.26





（三）加速耐候實驗

本試驗參考 ASTM G 155-13 (2013) 「非金屬材料氙弧燈試驗標準操作規範」中循環 1 (Cycle 1) 之試驗方法，將試材置入氙弧燈式耐候試驗機 (Xenon-Arc light exposure apparatus) 後，以氙弧燈光源於波長 340 nm 時為 0.35 W/m² 之光照強度下進行加速耐候試驗。試驗時，以 102 min 光照與 18 min 光照及灑水之循環方式進行，黑板溫度為 63°C，總試驗時間為 500 h。試驗時，每組各挑選 40 個樣本進行試驗；其中，15 個樣本為非破壞性檢測，分別於 0、2、4、8、16、32、64、100、200、300、400、500 h 對該樣本進行表面顏色、影像及光譜分析等，其餘 25 個樣本為破壞性檢測，分別於 0、100、200、300、500 h 對樣本進行機械性質分析（每一時間點各 5 個樣本）。

（四）性質分析

1. 表面影像 (Surface image)

本試驗利用多功能事務機 (M1120 MFP, HP, China) 之掃描功能，掃描孟宗竹材於加速耐候試驗各時間點之表面影像。

2. 表面顏色 (Surface color)

本試驗使用 Perkin-Elmer 紫外光-可見光分光光度 (Lambda 850+, MA, USA) 計搭配 Perkin-Elmer 積分球 (60 mm Pbs, MA, USA) 之方式，量測加速耐候試驗期間孟宗竹材之表面顏色，每組試材 15 重複。檢測時，依國際照明協會制訂之 CIE LAB 色彩體系，除測定試材之明度 (L^*)、紅綠參數 (a^*) 以及黃藍參數 (b^*) 之外，並進一步計算各組試材經加速耐候處理後之色差值 (ΔE^*)，其相關計算公式如下所示。

$$\Delta L^* = L^*_h - L^*_0$$

$$\Delta a^* = a^*_h - a^*_0$$

$$\Delta b^* = b^*_h - b^*_0$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

式中， L^*_h 、 a^*_h 以及 b^*_h 分別為加速耐候處理後試材之明度值、紅綠值以及黃藍值， L^*_0 、



1123080



a^*_0 以及 b^*_0 則分別為加速耐候處理前試材之明度值、紅綠值以及黃藍值。

3. 掃描式電子顯微鏡觀察

本試驗使用桌上型掃描式電子顯微鏡 (TM3000, Hitachi, Tokyo, Japan) 以非破壞性方式觀察竹青側表面組織結構於加速耐候試驗下的變化，每一組試材 5 重複。試材橫斷面結構則先使用圓鋸機將試材切成小塊後，再上機觀察，每一組試材 3 重複。上機之試材不經過鍍膜 (Coating) 處理，以避免影響後續實驗結果。上機前，試材以碳膠帶將其固定於鋁台上，再利用 15 kV 的電壓進行觀察。

4. 質量損失率 (Mass loss)

本試驗測量加速耐候試驗各時間點試材之絕乾質量變化，並依下式計算試材之質量損失率，每組試材 15 重複。

$$\text{Mass loss (\%)} = [(m_0 - m_t)/m_0] \times 100$$

式中， m_0 為加速耐候試驗處理前試材之絕乾質量， m_t 為加速耐候試驗各時間點試材之絕乾質量。

5. 抗彎性質 (Bending properties)

本試驗參照 CNS 454 (2013) 「木材抗彎試驗法」，量測試材之抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 及抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)，每組試材 5 重複。分析時，先將試材裁切成尺寸為 5 mm (T) × 20 mm (W) × 80 mm (L) 之試片，於絕乾狀態下測量其長度、寬度及厚度。之後，以跨距為試材厚度之 14 倍及載重速度為 5 mm/min 之試驗條件，於竹青側朝上的條件下進行中央集中載重抗彎試驗。記錄試片之最大載重值及其經時載重與變形量之後，並依下列式子計算加速耐候試驗過程中試材之 MOR 及 MOE 保留率 (Retention ratio)，各組試材 5 重複。

$$\text{MOR (N/mm}^2, \text{ MPa)} = 3PL/2bh^2$$

$$\text{MOE (N/mm}^2, \text{ MPa)} = \Delta PL^3/(4\Delta Ybh^3)$$





$$\text{MOR retention ratio (\%)} = (\text{MOR}_t / \text{MOR}_0) \times 100$$

$$\text{MOE retention ratio (\%)} = (\text{MOE}_t / \text{MOE}_0) \times 100$$

式中， P 為最大載重 (N)， L 為跨距 (mm)， ΔP 為比例限界內上限載重與下限載重之差值 (N)， ΔY 為 ΔP 相對之跨距中央之彎曲變形量 (mm)， b 為試片寬度 (mm)， h 為試片厚度 (mm)， MOR_0 與 MOE_0 分別為加速耐候試驗前之試材 MOR 與 MOE， MOR_t 與 MOE_t 分別為加速耐候試驗各個時間點之試材 MOR 與 MOE。

6. 全反射式傅立葉轉換紅外線光譜分析 (ATR-FTIR)

本試驗利用 Perkin-Elmer (Spectrum 100, UK) 傅立葉轉換紅外線光譜儀 (FTIR)，搭配全反射式 (Attenuated total reflectance, ATR) 附件，測定試材表面官能基之變化。分析時，所採用之解析度為 4 cm^{-1} ，掃描次數為 32 次，掃描波數 (Wavenumber) 範圍為 $4000\text{--}650 \text{ cm}^{-1}$ 。

7. 近紅外線光譜分析 (NIR)

本試驗利用 Perkin-Elmer (Spectrum Two NTM, UK) 之近紅外線光譜儀 (NIR)，測定試材表面官能基之變化。分析時，所採用之解析度為 8 cm^{-1} ，掃描次數為 32 次，掃描波數 (Wavenumber) 範圍為 $10000\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

8. X-ray 繞射試驗 (XRD)

本試驗使用 MAC science (MXP18, Japan) 之 X-ray 繞射儀 (X-ray diffraction spectroscopy, XRD)，分析試材於加速耐候試驗下之結晶度變化。分析時，所用的光源為 $\text{CuK}\alpha_1$ (40 kV , 30 mA)，掃描角 (2θ) 為 $2\text{--}35^\circ$ 。試材之纖維素結晶指數 (Crystallinity index, CrI) 參照 Hsu (2021) 之方法，藉由 Peakfit 軟體進行分峰擬和，並使 R^2 值達 0.99 以上。隨後，依下列式子下式計算試材之纖維素結晶指數。

$$\text{CrI (\%)} = [A_{\text{cry}} / (A_{\text{cry}} + A_{\text{am}})] \times 100$$

A_{cry} 為纖維素結晶區面積 ($2\theta = 14^\circ, 16^\circ$ 與 22°)， A_{am} 為纖維素非結晶區面積 ($2\theta = 18^\circ$)。





（五）統計分析

本試驗結果利用 SPSS 統計軟體進行單因子變異數分析 (One way analysis of variance, ANOVA)，並透過 Scheffé 檢定 (Scheffé test) 進行事後檢定分析各組間之差異性。

五、結果與討論

（一）真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗之顏色變化

孟宗竹試材經真空水熱處理後，因化學成分發生降解使竹材表面顏色產生變化，且隨真空水熱處理溫度及時間的增加顏色隨之加深（圖 1）。其中，以 180°C-16h 處理之試材顏色變化最大，顏色較深；相反的，以 160°C-4h 處理之試材顏色變化最小，顏色較淺且更接近未處理組（圖 1）。造成上述顏色變化，主要與竹材於真空水熱處理期間會產生具不飽和鍵或苯環結構等發色團之產物有關 (Wang et al., 2016)。一般而言，熱降解過程中除半纖維素或纖維素會產生糠醛 (Furfural)、羥甲基糠醛 (Hydroxymethylfurfural) 與脫水葡萄糖 (Anhydroglucose) 等呈色副產物之外，亦會造成木質素 β -O-4 鍵結斷裂，使甲氧基含量降低而提高具不飽和雙鍵及苯環結構化合物等發色團含量。此外，熱降解過程中木質素之熱降解溫度較半纖維素及纖維素為高，故經熱處理後含有較多發色團之木質素之比例提高，導致竹材之顏色變深。而抽出成分的降解並且遷移至竹材表面，此亦為竹材表面顏色加深之原因 (謝茗期, 2021; Sehlstedt-Persson, 2003; Sundqvist and Moren, 2002; Sandoval-Torres et al., 2012; Cademartori et al., 2013; Bekhta et al., 2014)。



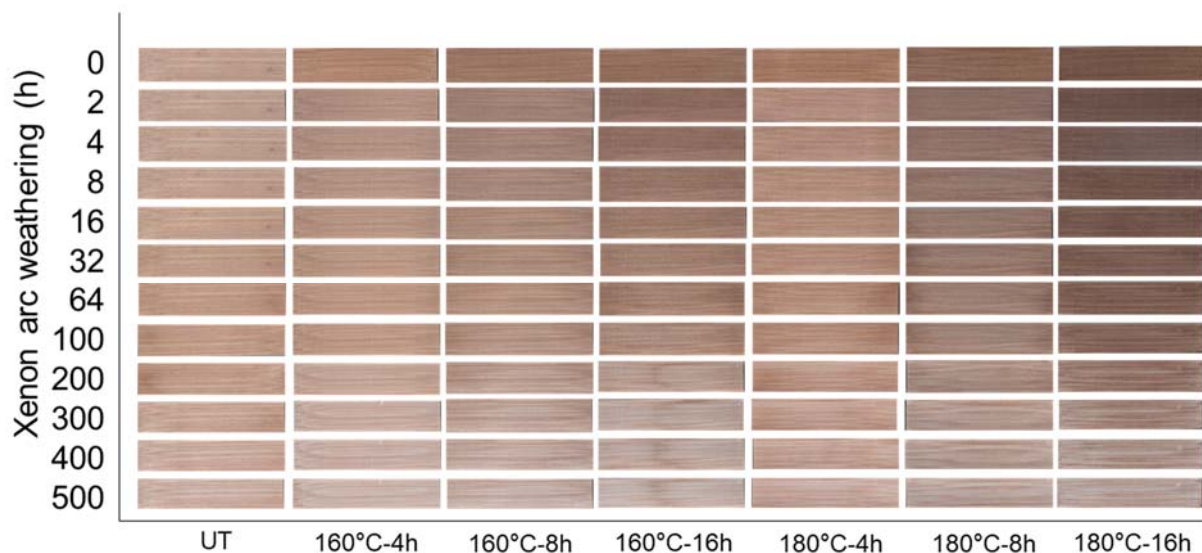


圖 1. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材表面影像。

Fig. 1. Surface images of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.

此外，為了進一步瞭解孟宗竹材於加速耐候試驗下，光降解的程度對表面顏色造成之影響，本試驗對試材表面進行影像觀察及顏色參數檢測，其試驗結果分別如圖 1 及 2 所示。經 500 h 加速耐候的試驗結果顯示，各組試材之表面顏色明顯較為灰白（圖 1）。進一步使用分光光度計量測各組試材之明度（ L^* ）、紅綠參數（ a^* ）、黃藍參數（ b^* ）及色差值（ ΔE^* ）時，由圖 2A 之結果可以發現，未處理的孟宗竹材之起始 L^* 值為 73.3，而隨著加速耐候時間的增加，其值變化幅度最小，僅增加至 75.1。相反的，竹材經真空水熱處理後， L^* 值隨真空水熱處理溫度及時間增加而降低，其值介於 65.2–46.1。此外，隨著加速耐候試驗時間增加，各真空水熱處理組別之 L^* 值均逐漸增加。其中，以 180°C-16h 組變化最大， L^* 值從 0 h 之 46.1 增加到 500 h 之 68.3；而 160°C-4h 組則變化最少， L^* 值從 0 h 之 65.2 增加到 500 h 之 75.0。在 a^* 方面（圖 2B），僅未處理孟宗竹材隨著加速耐候時間增加而逐步增加，其值由 0 h 之 3.9 增加至 500 h 之 5.1。反之，經真空水熱處理後的竹材，其 a^* 值除了在第 32 h 至 100 h 增加以外，其餘時間點皆隨著加速耐候試驗時間的增加而降低。其中，仍以 180°C-16h 組別變化最大， a^* 值由 0 h 之 9.5 降低至 500 h 之 3.8；而 160°C-4h 組則變化最小， a^* 值由 0 h 之 7.2 降低至 500 h 之 4.6。黃藍參數（ b^* ）的結果（圖 2C）則顯示未處理與真空水熱處理的竹材均在加速耐候試驗第 8 h





至 64 h 間增加，隨後則逐步降低。其中，160°C-4h 組的 b^* 值變化最大，其值由 0 h 之 26.0 降低至 500 h 之 16.0；而 180°C-16h 組則變化最小，其值由 0 h 之 19.7 降低至 500 h 之 13.9。由加速耐候第 500 h 的色差值 (ΔE^*) 結果可以得知，160°C 組別之色差值介於 14.3–18.8；180°C 組別之色差值介於 13.3–23.7；而未處理組之色差值僅 7.4。此外，色差值的結果顯示未處理組之試材，除了在第 100 h 與 200 h 間呈下降之趨勢外，其餘時間點皆隨著加速耐候時間增加而增加。而經真空水熱處理的竹材，除了在第 400 h 有些微降低以外，其餘時間點皆隨著加速耐候時間的增加而增加。整體而言，經真空水熱處理的竹材經 500 h 加速耐候處理後，其明度提高並且顏色更偏向藍綠色調。

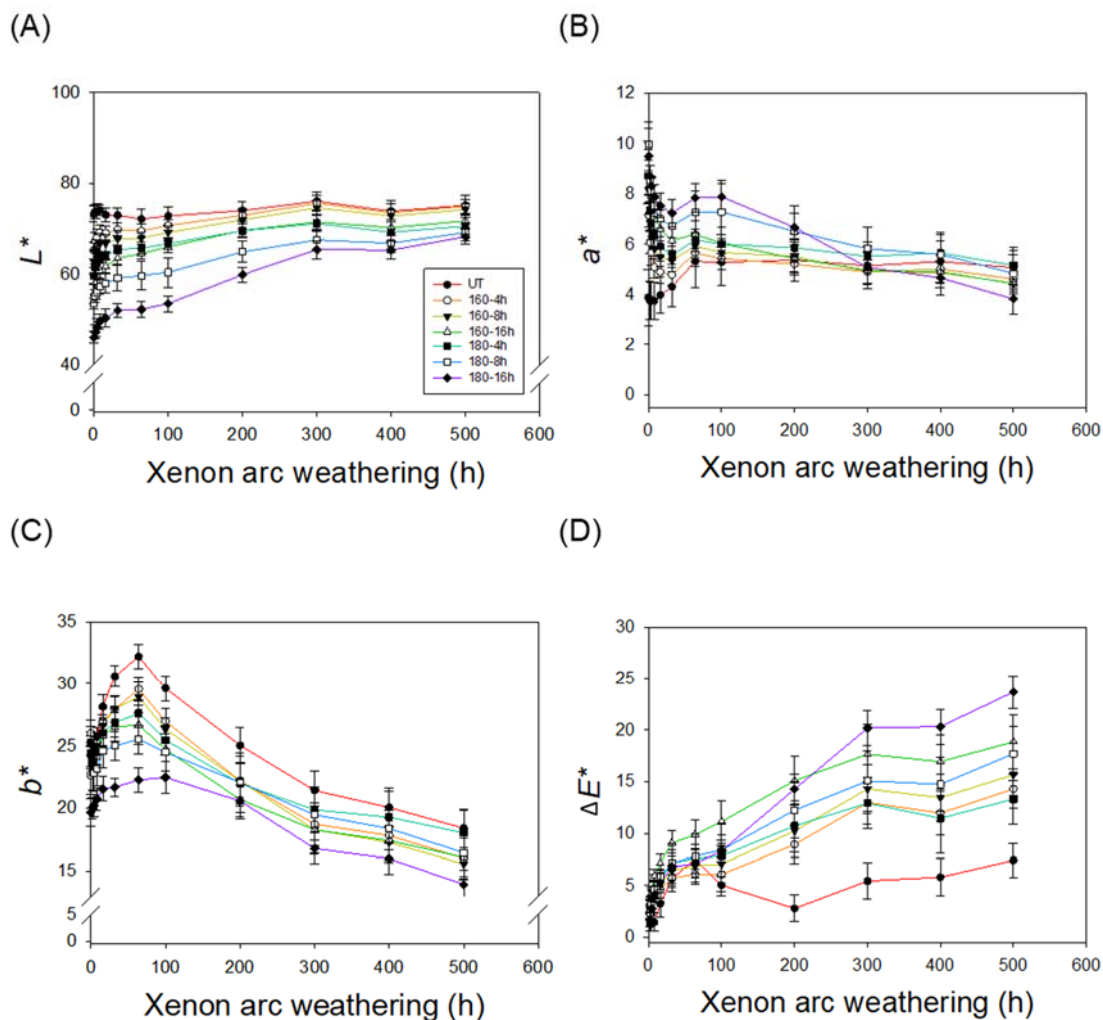


圖 2. 未處理及真空水熱處理孟宗竹材於氙弧燈加速耐候試驗過程中之明度 (A)、紅綠參數 (B)、黃藍參數 (C) 以及色差值 (D)。

Fig. 2. L^* (A), a^* (B), b^* (C), and ΔE^* (D) values of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test. Values are mean \pm SD ($n = 15$).





本試驗結果與 Kim 等人 (2016) 進行孟宗竹材 1 年戶外耐候結果趨勢相符，耐候試驗中 ΔE^* 及 L^* 值皆增加，而 a^* 與 b^* 值則下降。造成竹材於加速耐候試驗下之顏色變化與木質素光裂解 (Photodegradation) 有關 (Pandey, 2005)。木質素為良好的光吸收者，其在光波長 280 nm 至 400 nm 下有強的吸收波峰。當木質素吸收光之後會形成自由基，這些自由基會與氧反應形成發色團的羰基與羧基，進而造成顏色的改變 (Pandey, 2005)。此外，在加速耐候試驗中的淋洗作用，則會使木質素所形成之可溶性光降解產物因淋洗而被去除 (Denes and Young, 1999; Kalnins and Feist, 2002; Zhang et al., 2022)，導致竹材表面的退色。

(二) 真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗之表面結構變化

由於孟宗竹材於材料製備時已將竹青側表皮細胞去除，因此在掃描式電子顯微鏡觀察中，可以直接觀察到竹材的維管束 (Vascular bundle, VB) 與維管束間的薄壁細胞 (Parenchyma cell, PC) (如圖 3 所示)。圖中，單一個維管束組織中可以發現維管束鞘細胞 (Vascular bundle sheath cell) 佔的比例較高，因此最容易被觀察到，僅較低的機率會直接觀察到導管。此外，由於試驗前竹材業經刨光，因此在維管束間的薄壁組織常可見被破壞並形成不平整的切口，因此較難辨明是否係加速耐候試驗所造成的變化。然而，在維管束的區域，因細長的維管束鞘細胞形成較平整光滑的表面，因此較易確認是否為加速耐候試驗造成的變化，故後續的觀察均以維管束鞘細胞的變化來說明加速耐候試驗對於孟宗竹材的影響。



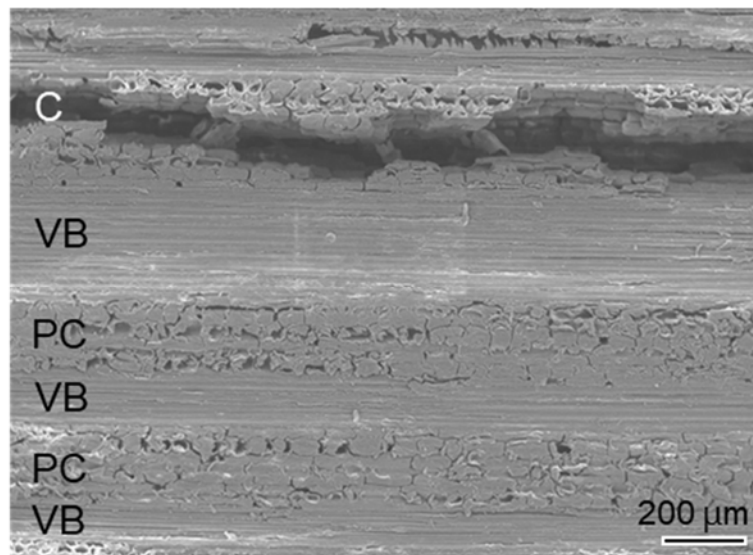


圖 3. 孟宗竹材表面之掃描式電顯影像。C：裂縫；PC：薄壁細胞；VB：維管束。

Fig. 3. SEM imeage of moso bamboo surface. C: Crack; PC: Parenchyma cell; VB: Vascular bundle.

由圖 4 表面結構之 SEM 觀察中可以發現，在加速耐候試驗初期（0–2 h），未處理組與真空水熱處理組的試材均無明顯的變化，其表面都僅有些許的小裂紋，這些裂紋長約 10–200 μm ，寬約 1–3 μm 。加速耐候試驗時間達 16 h 時，180°C-8h 與 180°C-16h 此二組別中已可觀察到表面具有裂縫，且這些裂縫長度均大於 1 mm 以上，而寬度則大於 100 μm 。耐候時間增加至 500 h 時，未處理組與真空水熱處理組皆可觀察到裂紋與裂縫，且這些裂紋與裂縫的數量會隨著真空水熱處理時間與溫度的增加而上升。



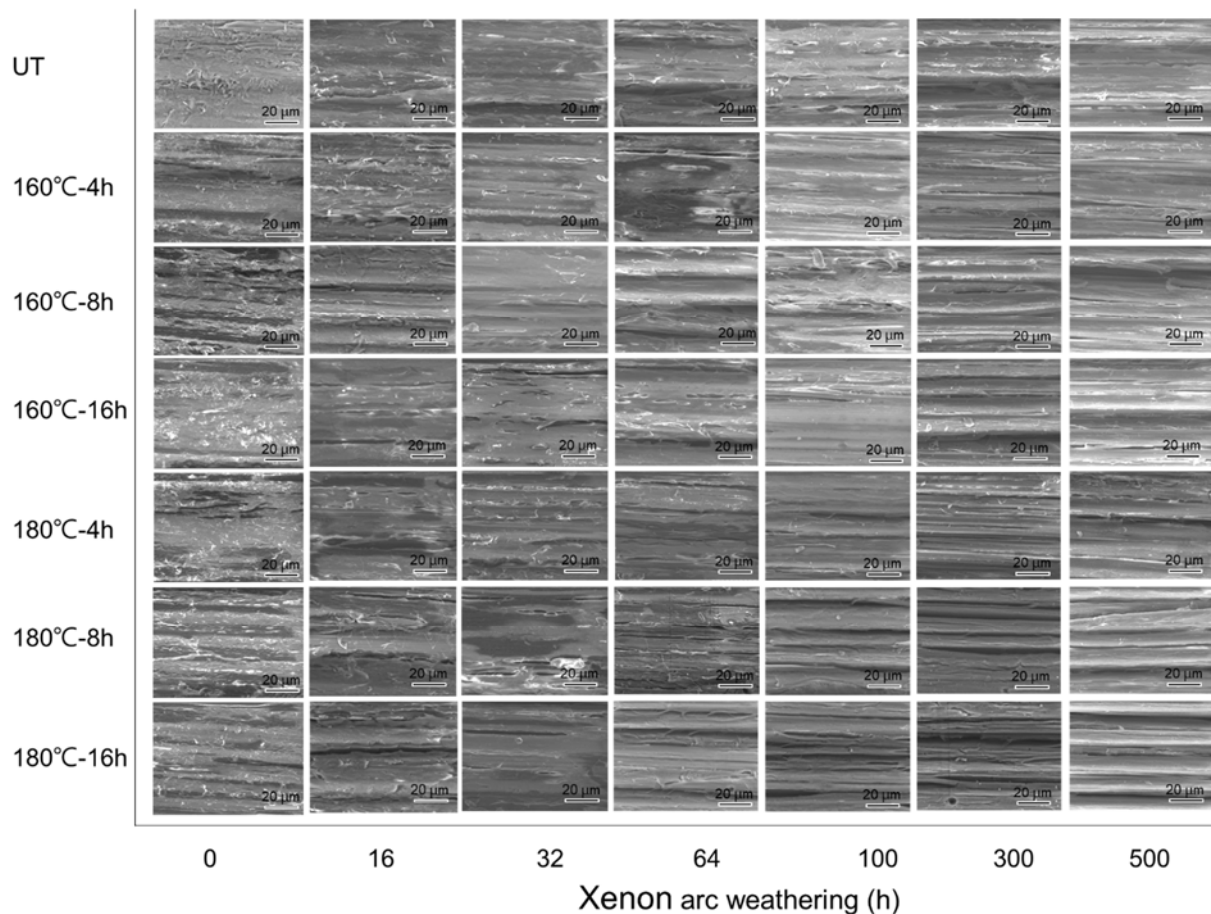


圖 4. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之掃描式電顯影像。
Fig. 4. SEM images of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.

上述試材表面之裂紋與裂縫的產生，推測與木質素的光降解有關。因木質素光降解時，其含量較高的中膠層會受到較嚴重的影響，故導致細胞壁剝離進而形成裂縫與裂紋 (Evans, 2008)。在本試驗中，180°C-8h 與 180°C-16h 此二組別具有較多的裂紋與裂縫產生，顯示其光降解程度較為嚴重。此外，裂紋與裂縫發生的位置較易出現於薄壁細胞區或是薄壁細胞與維管束交界區 (圖 5)，較少出現於維管束區。由此可以得知，薄壁細胞相較於維管束組織更易受到光降解的影響，而此現象也與 Kim 等人 (2016) 的結果相符。

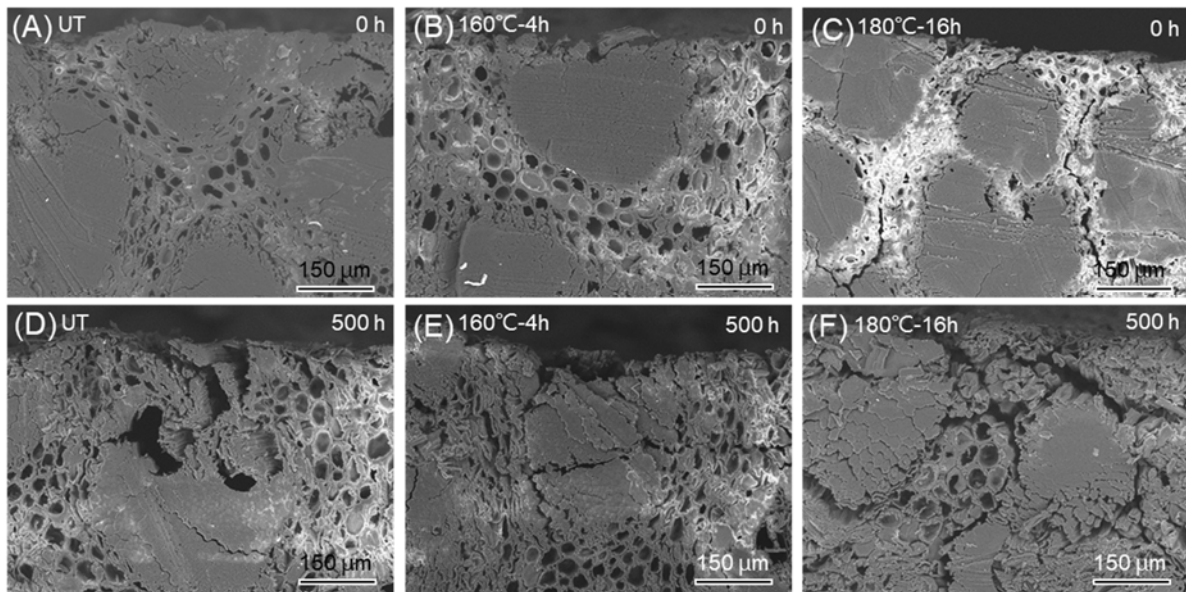


圖 5. 氙弧燈加速耐候試驗前 (A–C) 與試驗後 (D–F) 未處理及真空水熱處理 (160°C-4h、180°C-16h) 孟宗竹材橫切面之掃描式電顯影像。

Fig. 5. SEM images of the untreated (UT) and VH-treated (160°C-4h and 180°C-16h) moso bamboo tissue in transverse surface before (A–C) and after (D–F) xenon arc accelerated weathering test.

(三) 真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗之物理性質變化

竹材經熱處理後，其熱降解程度會影響竹材之性質，而在本計畫第二年度中已知不同真空水熱處理條件對竹材熱降解程度之影響。本年度則進一步分析經不同真空水熱處理條件的竹材，於加速耐候試驗中是否會產生不同的變化。其結果如圖 6 所示。經 500 h 的加速耐候試驗結果顯示，隨著加速耐候時間的累進，不管是未處理組或真空水熱處理組之質量損失均有增加的趨勢。然而，竹材經真空水熱處理過後，處理時間越長且處理溫度越高者，則更易造成耐候過程中的質量損失。其中，180°C-8h 與 180°C-16h 兩組在加速耐候第 500 小時時，呈現較高的質量損失率 (8.8–8.9%)，其餘組別之質量損失率則介於 4.6–6.1% 間。透過 ANOVA 統計結果得知從加速耐候第 8 h 開始，180°C-8h 與 180°C-16h 組的質量損失率皆顯著高於其他組別。造成上述質量損失顯著性的差異，推測與 180°C-8h 與 180°C-16h 兩組試材之裂紋與裂縫數量較多有關，因裂紋與裂縫產生的過程中，原先為薄壁細胞的區域因光降解作用而缺失，故造成顯著性較高之質量損失率。此外，由表面之 SEM 結果 (圖 4) 得知，在耐候試驗達 8–16 h 時，於 180°C-8h 與





180°C-16h 組別中已可觀察到表面具有裂縫，這些裂紋與裂縫的產生會使得光線更容易進入試材內部，而進一步加速其裂化反應。因此，觀察加速耐候試驗前 100 小時的質量損失率時（圖 6），此兩組試材之經時變化高於其他組別；換言之，其質量損失之速率高於其餘五組。

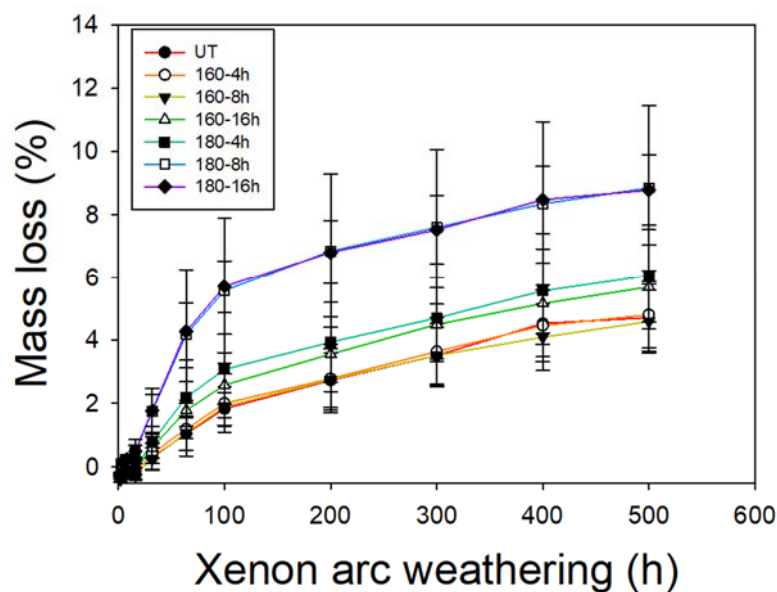


圖 6. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材質量損失率經時變化
Fig. 6. Mass loss of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo as a function of xenon arc accelerated weathering time

（四）真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗之機械性質變化

為瞭解不同真空水熱處理之孟宗竹材於加速耐候試驗中對機械性質的影響，本計畫於加速耐候第 0、100、200、300 及 500 h 時，分析試材之抗彎性質。其試驗結果如圖 7 所示。由圖 7 中抗彎彈性模數（MOE）之試驗結果可以得知，加速耐候試驗前未處理孟宗竹材之 MOE 為 9.1 GPa，而經真空水熱處理孟宗竹材之 MOE 則介於 8.7–6.5 GPa，各組之間無統計上顯著差異。在加速耐候試驗過程中，未處理組試材之 MOE 介於 7.5–8.3 GPa；真空水熱處理 160°C 組之 MOE 介於 8.5–6.9 GPa；而真空水熱處理 180°C 組之





MOE 介於 7.9–3.7 GPa，各組試材之 MOE 均較加速耐候前為低。當中，又以 180°C-16h 組於加速耐候第 300 h 測得之 MOE 值最低。在 MOE 保留率方面，除了未處理組試材之 MOE 保留率（90–82%）趨勢較一致外，經真空水熱處理竹材之 MOE 保留率則較無規律。其中，160°C 組之 MOE 保留率介於 103–71%；而 180°C 組之 MOE 保留率介於 123–51%。然而，在加速耐候試驗前各組 MOE 並無顯著差異，根據前人研究（Windeisen et al., 2009；Altgen et al., 2016）推測其可能原因為經真空水熱處理之竹材於熱處理期間會產生較氫鍵能量為高之化學鍵結，進而提高試材之剛性，使得其 MOE 表現在耐候試驗前與未處理組無顯著的差異。而加速耐候試驗經時變化中，整體結果可以發現 MOE 在各組間都有下降的趨勢。推測可能原因，主要為試材於加速耐候試驗過程中，因半纖維素降解而減少纖維素和木質素間之應力傳遞，以及木質材料熱降解產生之酸性副產物會加速主成分降解而破壞木質細胞結構，進而導致其 MOE 的降低（Borrega and Kärenlampi, 2007；Gündüz et al., 2009；Gawron et al., 2011）。



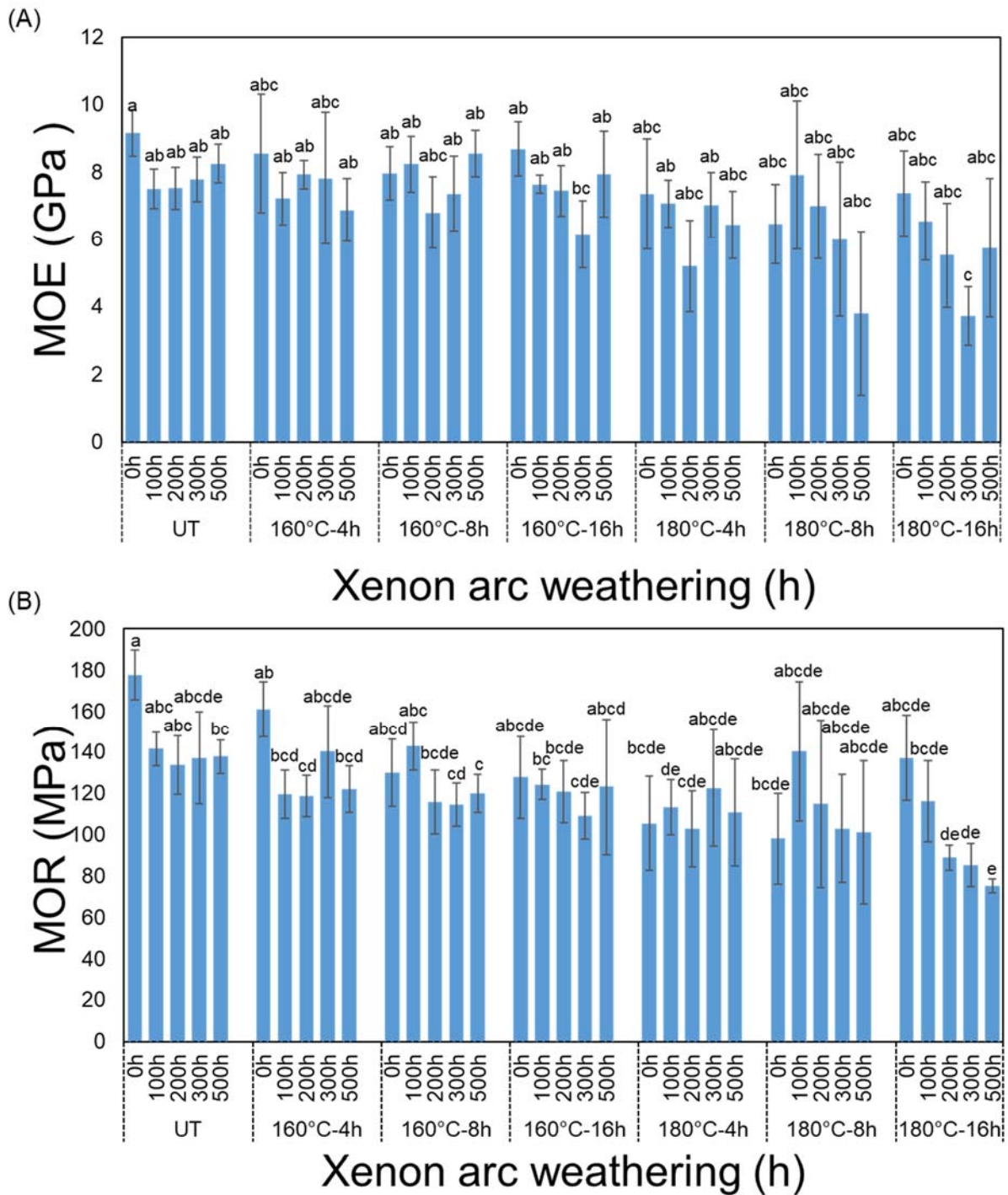


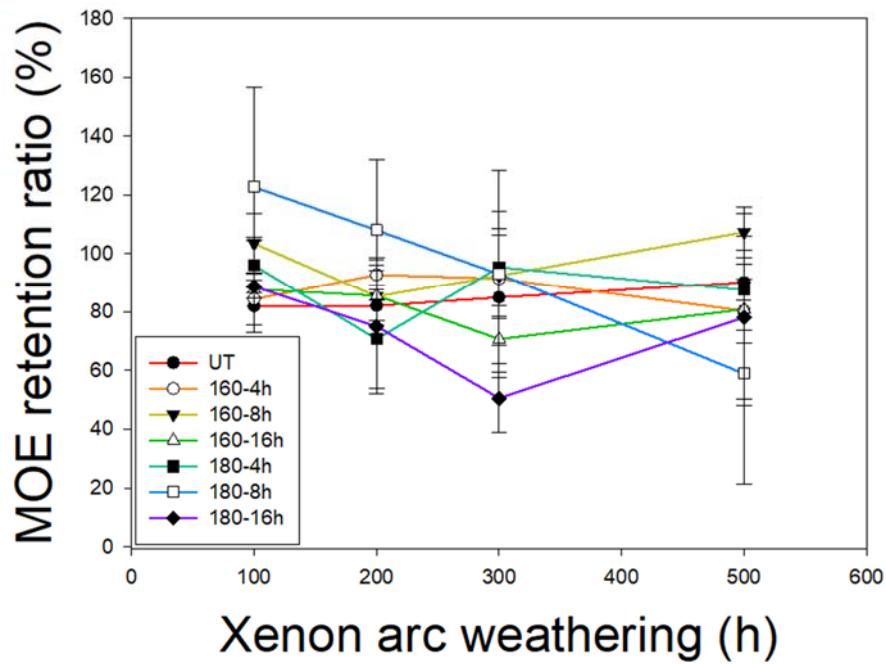
圖 7. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之抗彎彈性模數與抗彎強度。

Fig. 7. Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Bars with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).





(A)



(B)

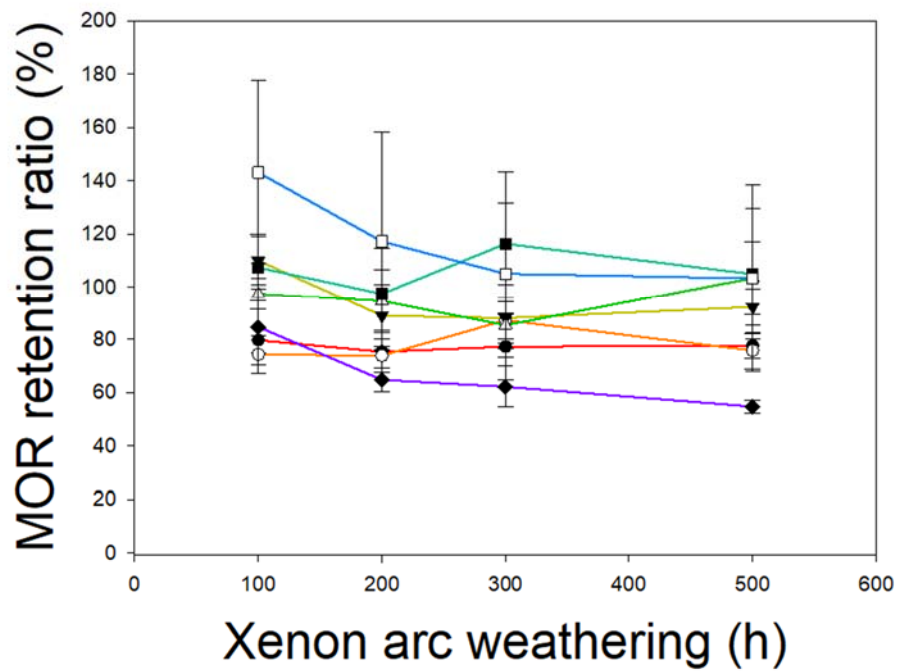


圖 8. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之抗彎彈性模數保留率與抗彎強度保留率。

Fig. 8. MOE retention ratio and MOR retention ratio of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.





至於抗彎強度 (MOR) 方面，由圖 7 可以發現加速耐候試驗前未處理組之 MOR 為 177.5 MPa，而真空水熱處理 160°C 組介於 127.8–160.9 MPa；真空水熱處理 180°C 組介於 98.1–137.3 MPa。此外，未處理組與兩組真空水熱處理組 (180°C-4h 及 180°C-8h) 間，具有顯著差異。推測其原因，主要係經真空水熱處理後，孟宗竹材中半纖維素降解並產生醋酸等酸性物質，進而使其抗彎強度降低 (Yun et al., 2016)。此外，根據卓志隆與陳志昇 (2014) 及謝茗期 (2021) 的研究指出，當熱處理材之質量損失率大於 10% 時，強度性質會大幅降低。而由本計畫第二年的試驗結果也可以得知，隨著真空水熱處理的溫度提高，質量損失率也會隨之提高，同時並伴隨著 MOR 顯著降低，顯示該試驗結果與上述研究相似。而在 500 h 加速耐候試驗中，未處理組之 MOR 介於 141.5–133.8 MPa；真空水熱處理 160°C 組之 MOR 介於 142.9–109.1 MPa；而真空水熱處理 180°C 組之 MOR 介於 140.5–75.2 MPa，各組試材 MOR 在加速耐候試驗過程中之趨勢，皆隨耐候時間增加而下降。當中，尤以 180°C-16h 於加速耐候第 200–500 h 測得之 MOR 值最低。另一方面，MOR 保留率結果 (圖 8) 顯示，於加速耐候試驗達 500 h 時，未處理組竹材仍具有 77.6% 之保留率，且加速耐候過程中，強度保留率維持在 75.3–79.7%。相對地，經真空水熱處理的竹材其保留率介於 54.8–143.1%，其整體趨勢仍隨加速耐候時間增加而降低。

綜合表面 SEM 觀察、質量損失率與機械性質的結果可以得知，竹材經真空水熱處理時溫度越高與時間越久，其在耐候試驗過程中更容易受到木質素與半纖維素降解的影響，導致試材表面具有較多的裂紋與裂縫，使得光線更容易進入試材內部並造成光降解反應，進而提高質量損失率與降低試材之機械性質。相對地，經真空水熱處理時溫度較低且時間較短者，其各項數值愈接近未處理組。

(五) 真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗之化學性質變化

竹材與木材相似，於熱處理過程中化學組成分均會有所變化，如：半纖維素發生去乙酰基反應 (Deacetylation)、解聚合反應 (Depolymerization) 以及脫水反應 (Dehydration)





(Song et al., 2018)；木質素發生結構改變、縮合反應(Condensation)以及交聯反應(Cross linking) (Nuopponen et al., 2004；Wikberg and Maunu, 2004)；抽出物質產生揮發物質及生成新化合物 (Hill, 2006)等。而傅立葉轉換紅外線光譜(FTIR)及近紅外線光譜(NIR)二者均為快速且方便之光譜分析技術，已廣泛應用於探討木材化學結構變化(Popescu et al., 2007)。因此，為了瞭解加速耐候試驗過程中，不同真空水熱處理孟宗竹材表面化學官能基之變化，本試驗分別以 FTIR 及 NIR 對各組試材進行分析。由圖 9 之 FTIR 圖譜可以發現，孟宗竹材之特性吸收峰主要分布於波數 $3800\text{--}2750\text{ cm}^{-1}$ 及 $1800\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ 之指紋圖譜區間。其中，波數 3340 cm^{-1} 為竹材中羥基(--OH)之特定吸收峰；波數 2910 cm^{-1} 為亞甲基(C--H)之非對稱伸縮振動吸收峰；波數 1730 cm^{-1} 為乙醯基中羰基(C=O)之伸縮振動吸收峰；波數 1600 、 1510 以及 1230 cm^{-1} 為木質素苯環(C=C)之特定吸收峰；波數 896 cm^{-1} 為纖維素碳氫鍵(C--H)之特定吸收峰；波數 834 cm^{-1} 為癒創木型(Guaiacyl units)木質素碳氫鍵(C--H)之特定吸收峰(Zhang et al., 2022)。

在加速耐候試驗前 100 h 結果中， 1730 cm^{-1} 吸收峰強度在各組間均有逐漸增加的趨勢；其中又以加速耐候第 64 h 之 160°C-4h 與 160°C-8h 兩組有較高的吸收峰強度。而 1730 cm^{-1} 吸收峰強度與試材之發色團中的羰基含量有關(Pandey, 2005)，顯示此兩組試材於耐候試驗初期含發色團產物比例提高。然而在加速耐候第 100 h 後， 1730 cm^{-1} 吸收峰在各組間都明顯下降，此現象可能與發色團受到水的淋洗有關，並使羰基含量下降。此外，在加速耐候試驗前 100 h 結果中， 1600 、 1510 及 834 cm^{-1} 之木質素特定吸收峰強度在未處理組與真空水熱處理組都呈現逐漸降低的趨勢，並在加速耐候試驗 100–500 h 結果中其吸收峰已無明顯訊號。Evans 等人(2002)指出木材於耐候試驗過程中，木質素會產生劣化現象，從而導致 1600 及 1510 cm^{-1} 訊號降低。而在本次試驗當中，尤以 180°C-16h 組的波峰強度下降較為明顯，且在耐候時間達 32 h 時即無明顯的波峰訊號，顯示 180°C-16h 試材之木質素劣化情形較為嚴重。



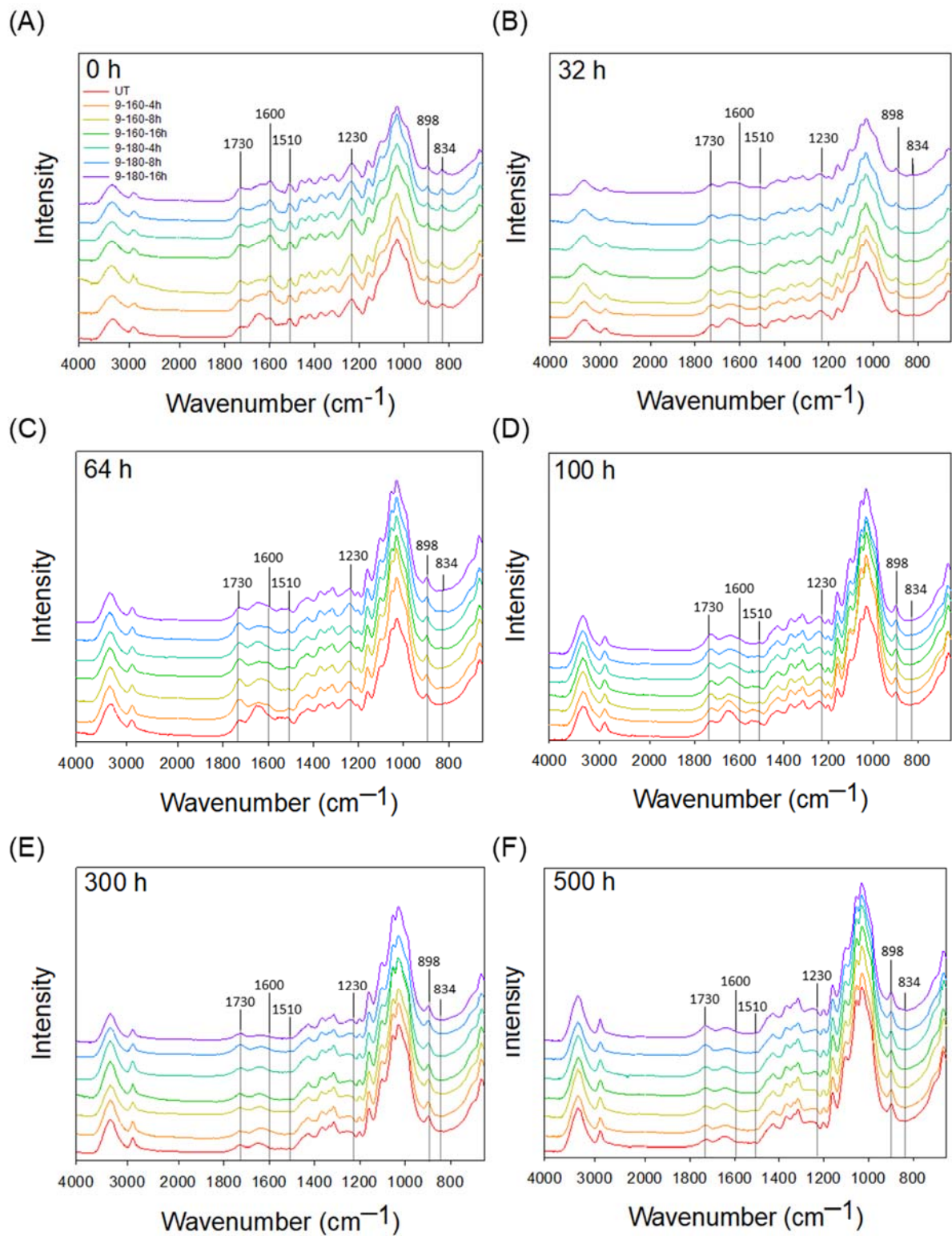


圖 9. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之 FTIR 圖譜。

Fig. 9. FTIR spectra of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.





另一方面，由圖 10 真空水熱處理孟宗竹材之 NIR 圖譜可以發現，竹材之 NIR 圖譜與木材相似，主要可分為下列 5 個區域：波數 $9000\text{--}7500\text{ cm}^{-1}$ 為醣類及木質素之甲氧基及亞甲基中 C-H 官能基之第 1 及第 2 倍頻 (overtone) 彎曲振動吸收；波數 $7500\text{--}6100\text{ cm}^{-1}$ 為 C-H 官能基第 1 倍頻吸收帶及 O-H 官能基第 1 倍頻伸縮振動吸收；波數 $6100\text{--}5400\text{ cm}^{-1}$ 為脂肪族及芳香族中 C-H 官能基伸縮振動及所有主成分之 O-H 官能基振動吸收；波數 $5400\text{--}4525\text{ cm}^{-1}$ 為 C=O 官能基、O-H 官能基以及芳香族之伸縮及變形振動等吸收峰；波數 $4525\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 為 C-H 官能基伸縮及變形振動吸收(謝茗期, 2021; Popescu et al., 2018)。由本計畫第二年之成果顯示波數 5166 cm^{-1} 、 6882 cm^{-1} 、 8238 cm^{-1} 吸收峰強度會受試材之熱改質溫度影響造成其訊號強度上地變化。然而，這些竹材經 500 h 加速耐候試驗過程中，這些官能基的訊號強度不論是在未處理組與真空水熱處理組的比較中，亦或是單一組別於不同加速耐候時間的比較中均無明顯的變化，顯示這些官能基訊號較不受加速耐候試驗的影響。



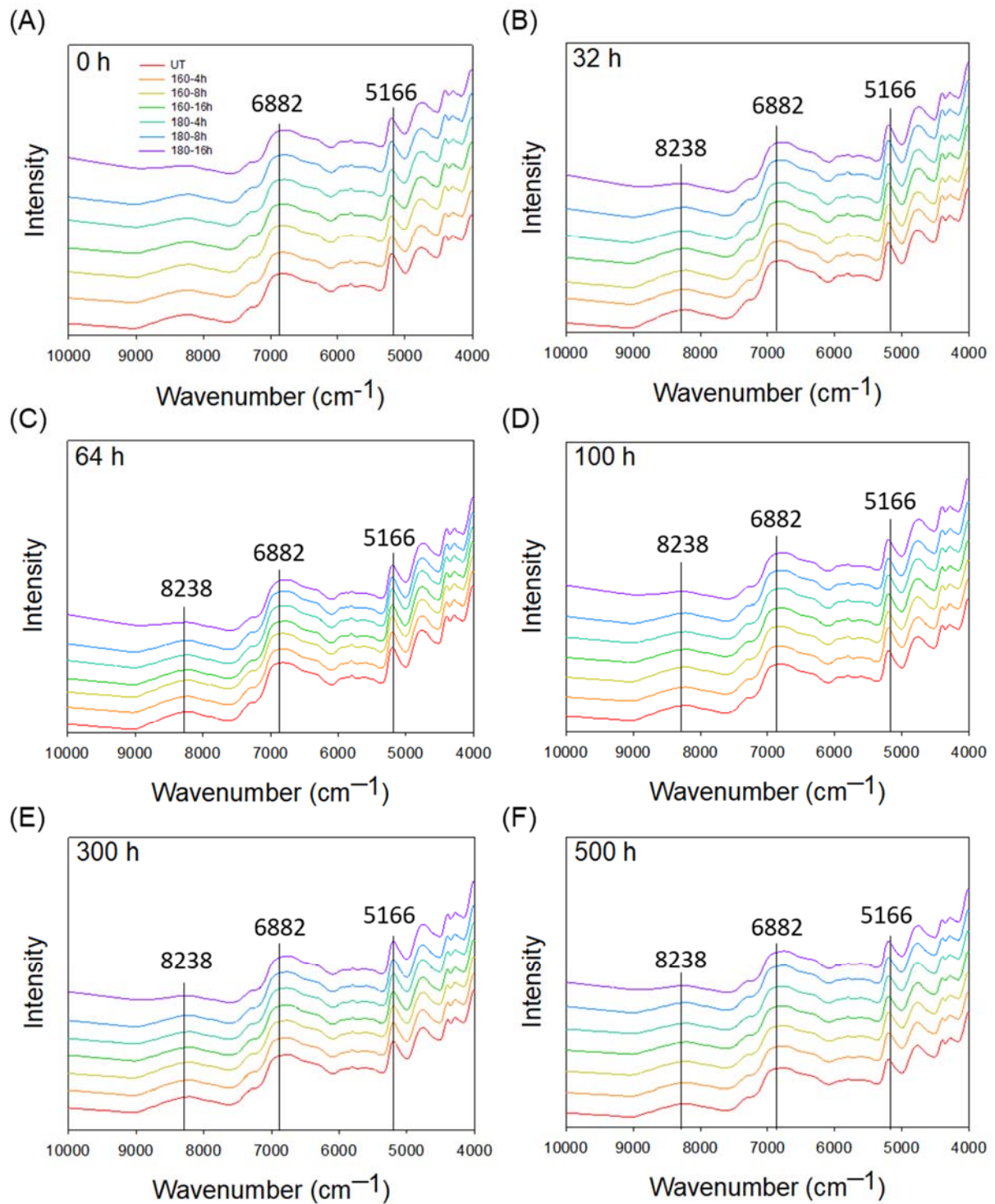


圖 10. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之 NIR 圖譜。

Fig. 10. NIR spectra of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.





再者，為瞭解不同真空水熱處理孟宗竹材於加速耐候試驗下之結晶度變化，本計畫利用 XRD 檢測各組試材於加速耐候試驗第 0、100、200、300、500 h 之結晶結構，並進一步計算其結晶指數 (CrI)。由圖 11 之 XRD 分析結果可以發現，未處理及經真空水熱處理孟宗竹材於掃描角 15° 及 22° 處均具有明顯之繞射峰，其分別代表纖維素 101/ $10\bar{1}$ 以及 002 結晶面之繞射峰。在不同真空水熱條件下，此繞射峰並無顯著位移現象，顯示真空水熱處理對孟宗竹材之纖維素結晶結構並無顯著影響。在結晶度方面，未處理孟宗竹材之結晶指數於加速耐候試驗前為 56%，而經真空水熱處理後的各組試材的結晶指數則介於 53-60% 之間，顯示真空水熱處理對於結晶度並無顯著影響。此外，在不同加速耐候時間之 XRD 結果比較中可以得知，未處理組與真空水熱處理組之試材其繞射峰並無顯著位移現象，此結果亦顯示加速耐候試驗對纖維素結晶結構並無顯著影響。然而，由圖 11F 之結晶指數比較中可以發現，未處理組與真空水熱處理組在其第 300 與 500 h 有較高的結晶指數。Ghavidal 等人 (2020) 指出，木材於耐候試驗期間其木質素、半纖維素以及非結晶區纖維素之降解，會提高纖維素之相對結晶度。同樣的，Ray 等人 (2022) 之研究亦指出，由於纖維素的化學鍵結能量較高，使得纖維素結晶區域較不易受到光照的影響而降解；相對的，非結晶區纖維素則較易於受到耐候試驗之影響而減少，故造成試材之結晶度提高。



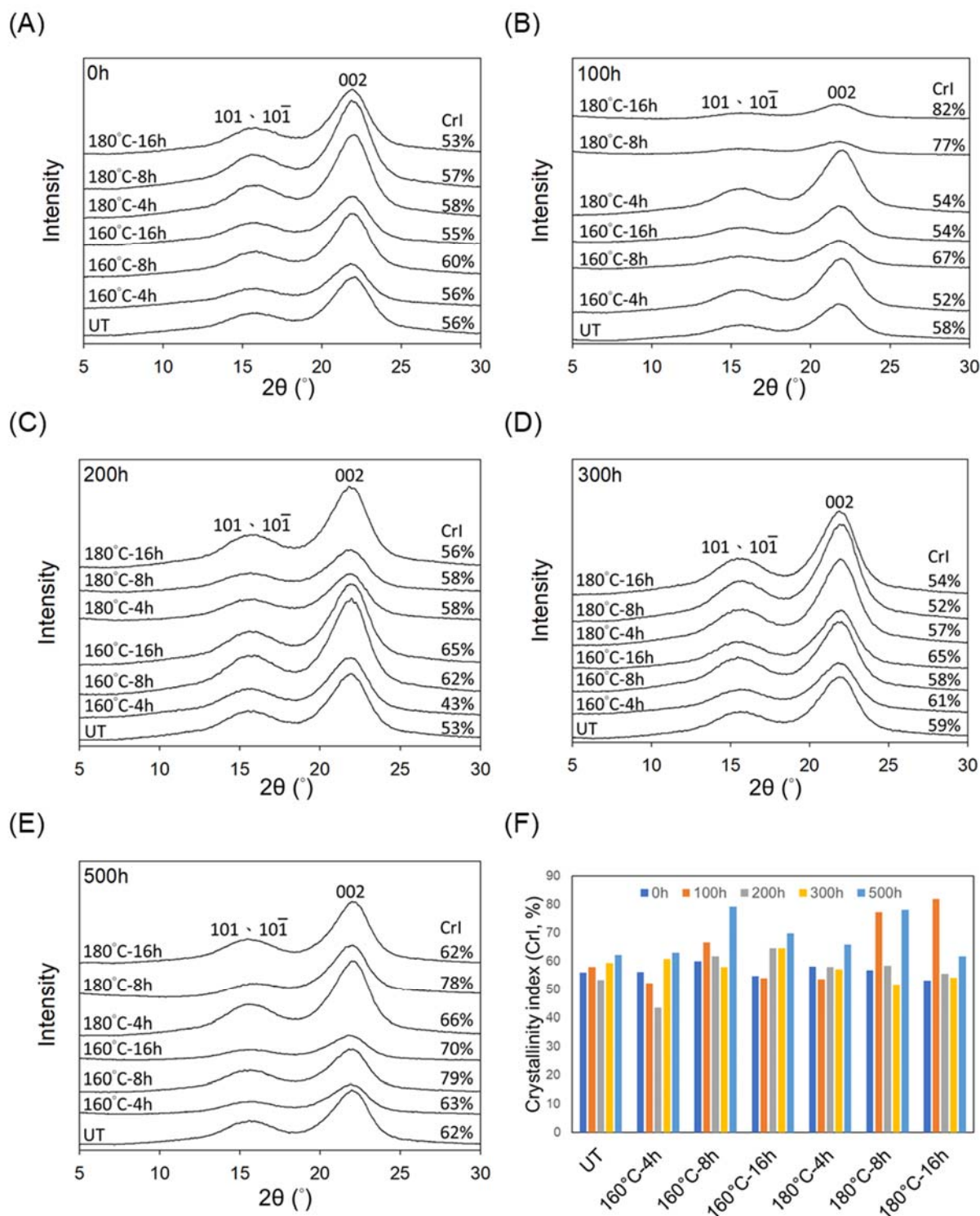


圖 11. 氙弧燈加速耐候試驗過程中未處理及真空水熱處理孟宗竹材之 XRD 圖譜 (A-E) 與結晶度變化 (F)。

Fig. 11. XRD spectra (A-E) and crystallinity index (F) of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during xenon arc accelerated weathering test.





六、 結論

本年度計畫針對第二年所製備不同熱改質處理竹材進行人工加速耐候試驗，以探討真空水熱處理對孟宗竹材耐候性質之影響，藉此評估其應用於耐久性竹材製品之可行性。依 500 h 氙弧燈加速耐候試驗結果可以得知，竹材在顏色穩定性與機械強度方面均隨著真空水熱處理時間與溫度增加而降低其耐候性；惟真空水熱處理是否能改善竹材於耐候試驗下之尺寸安定性與耐腐朽性，仍需要日後試驗進一步驗證。而本計畫已順利達成期末計畫之目標，完成真空水熱處理對孟宗竹材耐候性質分析，此性質結果可作為未來耐久性竹材製品開發及產業化應用之參考。

七、 建議

由前述研究結果可以得知，氙弧燈加速耐候試驗會降低真空水熱處理竹材之顏色堅牢度與機械性質。然而，由圖 S1 實際戶外耐候試驗（試驗期間未降雨）初步結果可以發現，經真空水熱處理之孟宗竹材，其材表面顏色堅牢均較未處理者為佳，且隨真空水熱處理時間與溫度的增加其表面顏色堅牢度愈佳。顯示，在未受水分淋洗的條件下，真空水熱處理孟宗竹材具有良好的耐光性，故建議真空水熱處理之竹材，未來可運用於室內裝修材料之使用。此外，藉由真空水熱處理時間與溫度的調整亦可改變竹材顏色之深淺，以迎合大眾喜好，圖 S2 即係以未處理及不同真空水熱處理竹材所製之百葉窗外觀圖樣。



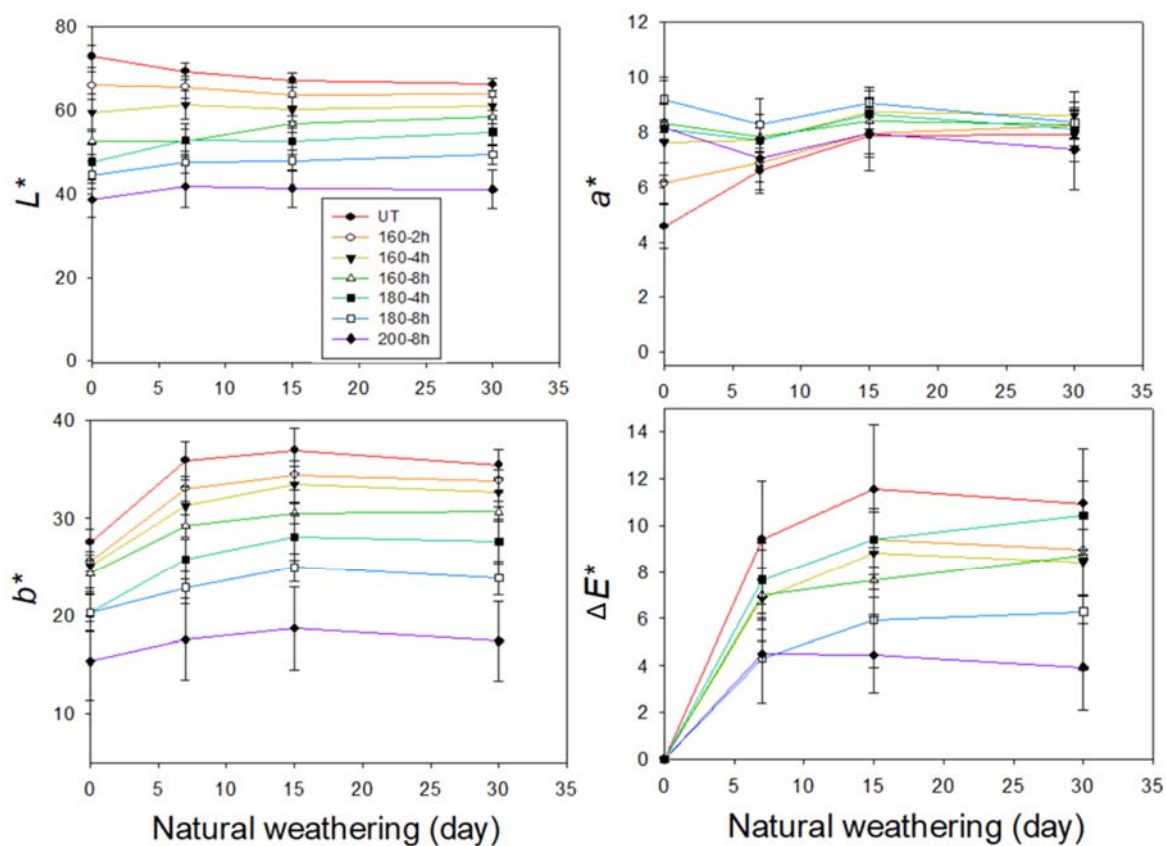


圖 S1. 未處理及真空水熱處理孟宗竹材於戶外耐候試驗過程中之明度 (A)、紅綠參數 (B)、黃藍參數 (C) 以及色差值 (D)。(註：試驗期間未降雨)

Fig. S1. L^* (A), a^* (B), b^* (C), and ΔE^* (D) values of untreated (UT) and VH-treated moso bamboo during natural weathering test. Values are mean \pm SD ($n = 15$).



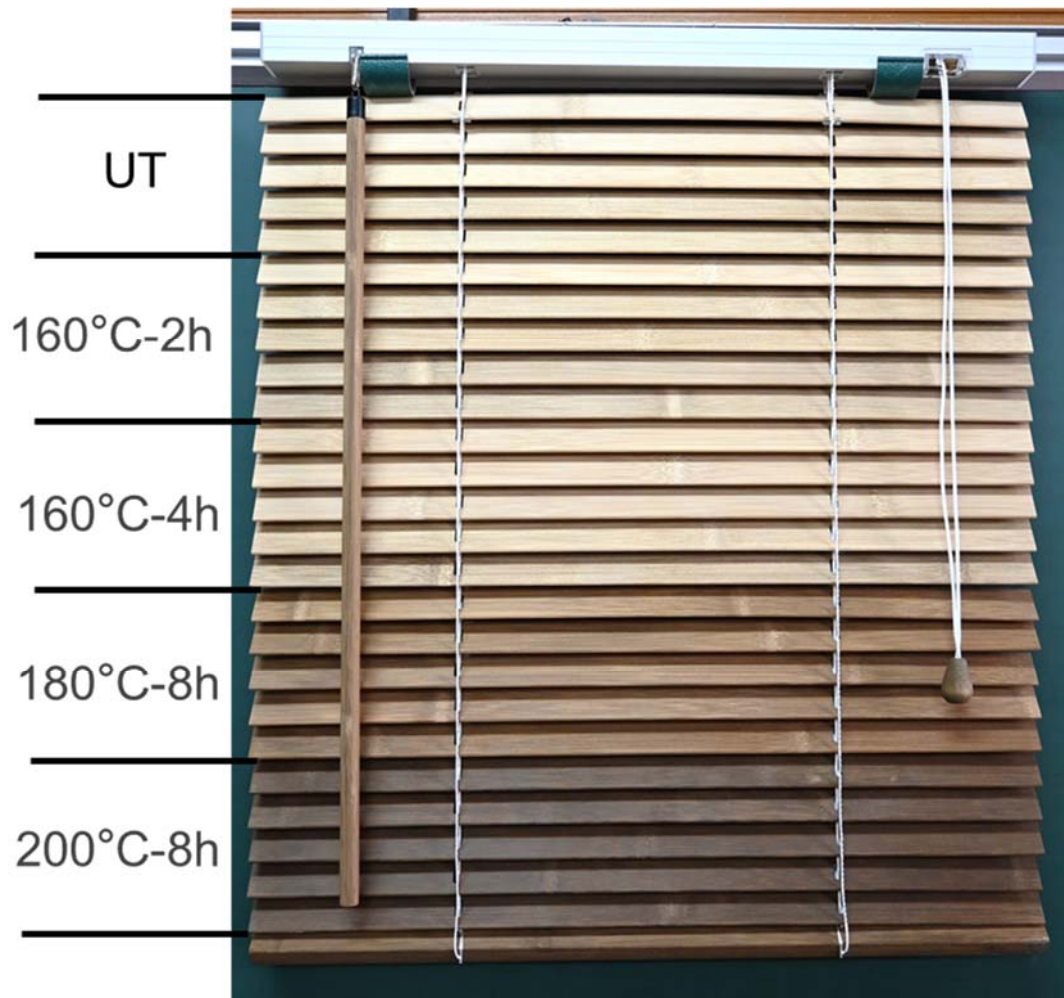


圖 S2. 由未處理及真空水熱處理孟宗竹材所製之百葉窗。

Fig. S2. Blinds made from untreated (UT) and VH-treated moso bamboo.





八、參考文獻

1. 中華民國國家標準 CNS 454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。
2. 文化部 (2014) 台灣竹產業基礎調查與竹林研發調查。2014 年 12 月 15 日。取自：
http://cci.culture.tw/cci/cci/market_detail.php?sn=9728
3. 王瀛生、吳孟玲 (2010) 台灣竹材替代木質材料展現竹之美。林業研究專刊 17(4)：54-60。
4. 吳仕揚 (2015) 竹齡及高度對孟宗竹及其竹展開板物理及機械性質之影響。國立中興大學森林學系碩士論文。67 頁。
5. 卓志隆、陳志昇 (2014) 熱處理對三種國產人工林木材力學性質之影響。林業工業 33(1)：1-12。
6. 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬 (2015) 第 4 次全國森林資源調查成果概要。台灣林業 41(4)：3-13。
7. 邱祈榮 (2011) 竹林面積知多少？林業研究專訊 18：16-18。
8. 路統信 (1986) 我國竹類植物及其地理分佈。現代育林 2(1)：85-94。
9. 謝茗期 (2021) 真空水熱處理對巒大杉木材物理化學、抗生物性及潛變性質之影響。國立中興大學森林學系碩士論文。120 頁。
10. Altgen, M., W. Willems, and H. Militz (2016) Wood degradation affected by process conditions during thermal modification of European beech in a high-pressure reactor system. Eur. J. Wood Prod. 74:653-662.
11. ASTM G155-13 (2013) Standard practice for operating xenon arc light apparatus for exposure of non-metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
12. Bekhta, P., S. Proszyk, and T. Krystofiak (2014) Colour in short-term thermo-mechanically densified veneer of various wood species. Eur. J. Wood Wood Prod. 72(6):785-797.
13. Borrega, M. and P. Kärenlampi (2007) Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. Eur. J. Wood Wood Prod. 66:63-69.





14. Cademartori, P. H. G., P. S. dos Santos, L. Serrano, J., Labidi, and D. A. Gatto (2013) Effect of thermal treatment on physicochemical properties of Gympie messmate wood. *Ind. Crop. Prod.*, 45:360–366.
15. Cao, Y., J. Lu, R. Huang, and J. Jiang (2012) Increased dimensional stability of Chinese fir through steam-heat treatment. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70:441–444.
16. Denes, A. R., and R. A. Young (1999) Reduction of weathering degradation of wood through plasma-polymer coating. *Holzforschung* 53:632–640.
17. Esteves, B. and H. Pereira (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4:370–404.
18. Evans, P. D., N. L. Owenb, S. Schmide and R. D. Webster (2002) Weathering and photostability of benzoylated wood. *Polym. Degrad. Stab.* 76:291–303.
19. Evans, P. D., A. K. Urban and M. J. A. Chowdhury (2008) Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. *Wood Sci. Technol.* 42:251–265.
20. Fujino, T., J. M. Calderon-Moreno, S. Swamy, T. Hirose, and M. Yoshimura (2002) Phase and structural change of carbonized wood materials by hydrothermal treatment. *Solid State Ionics* 151:197–203.
21. Gawron, J., M. Grzeskiewicz, J. Zawadzki, T. Zielenkiewicz, and A. Radomski (2011) The influence of time and temperature of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) heat treatment in superheated steam on the carbohydrates content. *Wood Res.* 56:213–220.
22. Ghavidal, A., A. Scheglov, V. Karius, C. Mai, A. Tarmian, W. Vioel, V. Vasilache, and I. Sandu (2020) In-depth studies on the modifying effects of natural ageing on the chemical structure of European spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*) woods. *J. Wood Sci.* 66:77.
23. Gündüz, G., D. Aydemir, and G. Karakas (2009) The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in





- physical properties. *Mater. Des.* 30(10):4391–4395.
24. Hill, C. A. S. (2006) *Wood modification: Chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons Ltd, England. 239 pp.
 25. Hsu, F. Y., K. C. Hung, J. W. Xu, T. L. Wu, and J. H. Wu (2021) Physicomechanical properties and creep behavior of plywood composed of fully and partially heat-treated veneers. *Wood Sci. Tech.* 55:445-460.
 26. Icel, B., G. Guler, O. Isleyen, A. Beram, and M. Mutlubas (2015) Effects of industrial heat treatment on the properties of spruce and pine woods. *Bioresources* 10:5159–5173.
 27. Kalnins, M. A. and W. C. Feist (2002) Increase in wettability of wood with weathering. *Forest Prod. J.* 85:1961–1969.
 28. Kim, Y. S., K. H. Lee and J. S. Kim (2016) Weathering characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescence*) exposed to outdoors for one year. *J. Wood Sci.* 62:332–338.
 29. Korkut, S. and I. Bektas (2008) The effects of heat treatment on physical properties of Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Forest Prod. J.* 58:95–99.
 30. Lovrić, A., V. Zdravković, R. Popadić, and G. Milić (2017) Properties of plywood boards composed of thermally modified and non-modified Poplar veneer. *Bioresources* 21:8581–8594.
 31. Martínez, Á. T., M. S. Francisco, J. Ruiz-Dueñas, P. Ferreira, S. Camarero, F. Guillén, M. J. Martínez, A. Gutiérrez, and J. C. del Río (2005) Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Int. Microbiol.* 8:195–204.
 32. Nuopponen, M., T. Vuorinen, S. Jämsä, and P. Viitaniemi (2004) Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. *J. Wood Chem. Technol.* 24(1):13–26.
 33. Ohnesorge, D., A. Tausch, I. Krowas, C. Huber, G. Becker, and S. Fink (2009) Laboratory





- tests on the natural durability of six different wood species after hygrothermal treatment. In: Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification. Stockholm, Sweden. pp. 159–164.
34. Pandey, K.K. (2005) A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. *Polym. Degrad. Stabil.* 87:375–379.
35. Popescu, C. M., M. C. Popescu, G. Singurel, C. Vasile, D. S. Argyropoulos, and S. Willfor (2007) Spectral characterization of eucalyptus wood. *Appl. Spectrosc.* 61(11):1168–1177.
36. Popescu, C. M., P. Navi, M. I. P. Peña, and M. C. Popescu (2018) Structural changes of wood during hydro-thermal and thermal treatments evaluated through NIR spectroscopy and principal component analysis. *Spectrochim. Acta. A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 191:405–412.
37. Rao, F., X. Li, N. Li, L. Li, Q. Liu, J. Wang, X. Zhu, and Y. Chen (2022) Photodegradation and photostability of bamboo: Recent advances. *ACS Omega* 7:24041–24047.
38. Rowell, R. M., R. E. Ibach, J. McSweeney, and T. Nilsson (2009) Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. In: Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification. Stockholm, Sweden. pp. 489–502.
39. Sandoval-Torres, S., W. Jomaa, F. Marc, and J. R. Puiggali (2012) Colour alteration and chemistry changes in oak wood (*Quercus pedunculata* Ehrh) during plain vacuum drying. *Wood Sci. Technol.* 46(1–3):177–191.
40. Sehlstedt-Person, M. (2003) Color responses to heat treatment of extractives and sap from pine and spruce. 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, August 24–29, pp. 459–464.
41. Song, K., I. Ganguly, I. Eastin, C. Dou, R. Bura, and A. Dichiaro (2018) Structure–property relationships of hydrothermally treated western hemlock. *SN Appl. Sci.* 1(84).
42. Sundqvist, B. and T. Moren (2002) The influence of wood polymers and extractives on





- wood color induced by hydrothermal treatment. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 60(5):375–376.
43. Wang, X., J. Liu, and Y. Chai (2012) Thermal, mechanical, and moisture absorption properties of wood-TiO₂ composites prepared by a sol-gel process. *Bioresources* 7:893–901.
 44. Wang, Z., B. Sun, and J. Liu (2016) Effect of thermo-vacuum treatment on the color and chemistry of larch wood. *BioRes.* 11(1):2349–2360.
 45. Wentzel, M., A. Roller, H. Pesenti, and H. Militz (2019) Chemical analysis and cellulose crystallinity of thermally modified *Eucalyptus nitens* wood from open and closed reactor systems using FTIR and X-ray crystallography. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 77:517–525.
 46. Wikberg, H. and S. Maunu (2004) Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. *Carbohydr. Polym.* 58:461–466.
 47. Windeisen, E., H. Bachle, B. Zimmer, and G. Wegener (2009) Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung* 63(6):773–778.
 48. Yun, H., K. Li, D. Tu, C. Hu, and G. C. South (2016) Effect of heat treatment on bamboo fiber morphology crystallinity and mechanical properties. *Wood Res.* 61(2):227–234.
 49. Zhang, Y. H., H. X. Ma, Y. Qi, R. X. Zhu, X. W. Li, W. J. Yu, and F. Rao (2022) Study of the long-term degradation behavior of bamboo scrimber under natural weathering. *NPJ Mater. Degrad.* 6:63.
 50. Zheng, R., M. A. Tshabalala, Q. Li, and H. Wang (2015) Construction of hydrophobic wood surfaces by room temperature deposition of rutile (TiO₂) nanostructures. *Appl. Surf. Sci.* 328:453–458.





112 年農業科技計畫審查意見回應表

☐計畫研提 ☐期中審查 ☒期末審查

計畫名稱：熱改質技術於耐久性竹材製品開發之應用(3/3)

執行單位：國立中興大學森林學系

計畫主持人：吳志鴻

項次	審查意見	意見回覆	修正頁次
1	本計畫利用氬弧燈加速耐候試驗測試熱(水氣)改質竹片之耐候性質，包含色之變化、強度、化學成分等之變化，已獲得預期效果。今後有關熱(水氣)改質可加強闊葉樹材之進行，因闊葉樹在室外使用其尺寸變化較大，即收縮與膨脹較大，經熱改質可將其改善。	感謝委員意見，在前人研究中，Ali 等人(2021) 整理出真空水熱處理運用於闊葉樹種的研究，經真空水熱處理之闊葉樹確實能有效改善其疏水性與提高尺寸安定性。日後可依此方法運用於具有開發潛力的闊葉樹種，以提高產品耐用性與使用價值。 參考文獻:Ali, M. R., U. H. Abdullah, Z. Ashaari, N. H. Hamid, L. S. Hua (2021) Hydrothermal Modification of Wood: A Review. Polymers 13:2612. https://doi.org/10.3390/polym13162612	研究報告無修正。
2	加速耐候試驗挑選 40 個樣本是否足夠進行相關性質的分析。	感謝委員意見，礙於加速耐候機空間有限，因此僅能以每組 40 個樣本進行試驗。其中，屬非破壞試驗者樣本數為 15；而破壞性試驗者，5 個試驗時間點各 5 個樣本(共 25 個)。然就試驗結果之偏差值而言，各組結果應具代表性，可作為日後竹材改質性質之參考依據。	研究報告無修正。
3	請說明如何測量各時間點試材之絕乾質量。	感謝委員意見，試材從加速耐候機取出後，置於 60℃烘箱進行乾燥處理。待乾燥時間達 48 小時(質量達恆重)，再將試材取出量測其絕乾質量。	研究報告無修正。
4	請說明 p.7 中 CrI 計畫之 Acry 是否為 14°、	感謝委員意見，Acry 的確係指 2θ 為 14°、16°及 22° 繞射峰面積，且本計	研究報告無修正。



1123080



	16°、22°繞射。	畫並依此計算試材之 CrI。	
5	就耐候性質分析結果，本研究就預開發產品是否推薦熱處理改質？	感謝委員意見，由本研究結果可以得知，氙弧燈加速耐候試驗會降低真空水熱處理竹材之顏色堅牢度與機械性質。然而，由實際戶外耐候試驗（試驗期間未降雨）初步結果可以發現，經真空水熱處理之孟宗竹材，其材表面顏色堅牢均較未處理者為佳，且隨真空水熱處理時間與溫度的增加其表面顏色堅牢度愈佳。顯示，在未受水分淋洗的條件下，真空水熱處理孟宗竹材具有良好的耐光性，故建議真空水熱處理之竹材，未來可運用於室內裝修材料之使用。此外，藉由真空水熱處理時間與溫度的調整亦可改變竹材顏色之深淺，以迎合大眾喜好。	研究報告無修正。
6	國產孟宗竹材每年伐採量仍不少，惟大多僅利用魚海岸蚵架使用，竹材利用率不高。本研究以熱處理技術開發耐久性竹材藝品，目標極為明確，研究成果有助於竹材製品品質提升。	感謝委員肯定本計畫成果。	研究報告無修正。
7	本研究成果極為深入。相關成果是否能配合實例做深入淺出介紹，將有助於實務應用。	感謝委員意見，待戶外耐候試驗結果收集完畢並彙整成果後，可藉由竹材耐候性質與相關產業合作，以進行相關竹製產品開發。	研究報告無修正。
8	建議參考國際竹籐組織(INBAR) 成果，做國際性之竹材研究競爭。	感謝委員意見，未來若有機會會參考國際竹籐組織(INBAR) 成果，做國際性之竹材研究競爭。	研究報告無修正。
9	本研究是否有潛在廠商?未來技轉的規劃?	本計畫尚有部分研究細節需進一步研議與規劃，未來若有機會則會尋求廠商進行合作或技轉，並將產品	研究報告無修正。





		商業化。	
--	--	------	--

